

双碳背景下能源类新工科人才培养的课程体系改革与实践探究

尹丽洁 陈德珍 胡雨燕 冯昱恒 叶娜 黄静宽 腾露露
同济大学 汽车与能源工程学院
DOI:10.32629/mef.v9i3.19531

[摘要] 在“双碳”战略目标的驱动下,能源类新工科人才培养面临深刻变革。本文系统梳理了碳中和教育的研究背景与现状,提出了以“理论-实践-工程”三位一体为核心的教学改革思路,并从课程体系优化、教学内容更新、工程实践融合、碳核算方法构建等四个维度展开研究。通过将碳中和理念有机融入传热学、燃烧学等专业课程,构建系统性的碳排放核算知识体系,并结合火电厂工程实践案例与林木废弃物资源化碳减排核算,形成了面向“双碳”目标的能源类新工科人才培养新模式。研究表明,该模式能够有效提升学生的碳中和专业素养、实践能力与创新思维,为高校工程教育改革提供有益参考。

[关键词] 双碳; 新工科; 能源类专业; 人才培养; 课程改革; 碳中和

中图分类号: G622.3 **文献标识码:** A

Reform and Practice of Curriculum System for Cultivating New Engineering Talents in the Energy Sector toward Carbon Neutrality Goals

Lijie Yin Dezhen Chen Yuyan Hu Yuheng Feng Na Ye Jingkuan Huang Lulu Teng
College of Automotive and Energy Engineering, Tongji University

[Abstract] Driven by the strategic goals of "carbon peaking and carbon neutrality," the cultivation of new engineering talents in the energy sector is undergoing profound transformation. This paper systematically reviews the research background and current state of carbon neutrality education, and proposes a teaching reform framework centered on the trinity of "theory-practice-engineering". The study is conducted along four dimensions: curriculum system optimization, teaching content renewal, engineering practice integration, and carbon accounting methodology construction. By organically integrating carbon neutrality concepts into core courses such as Heat Transfer and Combustion Engineering, a systematic knowledge framework for carbon emission accounting is established. Combined with engineering practice cases from thermal power plants and carbon emission accounting for the resource utilization of forestry and garden waste, a new talent cultivation model for energy-sector new engineering students oriented toward the "dual carbon" goals is formed. The results demonstrate that this model can effectively enhance students' professional competency in carbon neutrality, practical abilities, and innovative thinking, providing a useful reference for engineering education reform in higher education institutions.

[Key words] Dual carbonnew; Engineering education; Energy-sector programs; Talent cultivation; Curriculum reform; Carbon neutrality

1 引言

随着全球气候变化的加剧与国际社会对可持续发展的高度关注,中国于2020年明确提出“碳达峰”与“碳中和”双目标,承诺2030年前实现碳排放达峰、2060年前实现碳中和。这一战略的提出,标志着我国将应对气候变化纳入国家发展全局,也意味着能源结构、产业体系与社会治理将面临深刻转型^[1]。《2030年前碳达峰行动方案》明确指出,要“推动绿色低碳理念融入国民教育体系”,加强碳中和和知识与能力的系统性培养。教育

等部门出台的《加强碳达峰碳中和高等教育人才培养体系建设工作方案》,进一步鼓励高校增设相关专业方向,改造升级传统专业。

当前碳中和背景下能源动力专业人才如何培养,已成为国内外教育学者研究的重点问题^[2]。能源动力专业人才基本素养新特质的深入研究是达到预期教育效果的关键^[3],多层次多要素全链培养模式是碳中和背景下能源动力专业人才培养的核心要素。在“双碳”战略目标驱动下,能源动力类专业教育正面临

转型升级的关键期,传统教学模式在适应新型能源体系人才培养需求方面存在明显不足,主要体现在以下几个方面:

(1) 教学内容陈旧滞后。当前能源动力类专业课程(如《燃烧学》《传热学》)仍以燃煤机组等传统技术为核心,对可再生能源耦合、碳捕集(CCUS)、氢能等前沿技术仅作概述性介绍,教材更新周期长(通常5—10年),难以匹配“双碳”技术的快速迭代^[7]。

(2) 学生实践能力不足。在传统灌输式教学模式下,学生不知道如何将知识应用于实际生产环节。在“双碳”背景下,相关企业面临转型压力,要求毕业生能够在不同场景中选择适宜的低碳技术^[12]。

(3) 校企合作不够深入^[23]。学校和企业之间缺乏有效的沟通和信息交流机制,校企合作项目大多停留在理论层面,双方合作往往只是短期项目而非持续稳定的合作关系。

(4) 实践平台资源匮乏。碳核算、碳市场模拟、新能源项目设计等实践平台资源相对不足,一套完整的碳中和实验室硬件成本昂贵,部分高校难以负担。

国内已有高校开展积极探索。燕山大学^[4]以建筑能源相关课程为例,通过线上线下混合式项目式教学,构建了“双碳”知识体系;清华大学碳中和能力提升项目^[5]形成了“交叉融合、真知实干、多元胜任”的培养特色;哈尔滨工业大学^[22]提出了“智慧能源动力专业”建设方案;天津大学^[20]构建了储能科学与工程专业实验教学体系。在国际层面,Rus等^[14]对高等教育机构的碳足迹评估进行了研究;Erica等^[15]以德国“碳中和大学”为研究对象探讨了高校融入碳中和理念的重要性;Beiling等^[16]综合分析了全球高校碳足迹的研究趋势;Meng等^[17]探讨了将绿色低碳理念融入高校思政教育的路径。

在具体课程教学改革方面,周鹏等^[6]研究了高职环保类专业实践教学体系重构;安周建等^[7]探讨了碳中和通识类课程教育改革;李小菊等^[8]研究了“双碳”理念融入《环境影响评价》课程的路径;叶波等^[9]研究了“碳达峰碳中和”专题教学的构建;温昕等^[10]探讨了碳中和背景下高分子材料专业课程改革;董永军等^[11]对新能源转换技术的科教融汇进行了探索;丁艳等^[12]针对应用型本科能源动力类新工科人才培养进行了深入实践;陈斌等^[13]探究了环境类新工科“双创”人才培养路径。

综上所述,现有研究在将碳中和与专业工程实践深度结合方面仍有不足,亟需系统性改革。本研究以同济大学机械与能源工程学院本科教育改革项目为依托,从理论教学模型重构、实践教学深化、工程案例设计、碳核算方法体系建立四个维度,探索“双碳”背景下能源类新工科人才培养的课程体系改革路径与实践方案。

2 改革思路与基本原则

本研究以“理论—实践—工程”三位一体为核心,遵循以下改革逻辑:以“双碳”战略为导向重构课程体系,以跨学科融合为路径更新教学内容,以真实工程情境为载体强化实践教学,以产教融合为纽带提升人才培养质量。具体遵循以下四项基本原则:

(1) 理论与实践相结合原则。确保碳中和和相关理论知识的系统性和完整性,为实践教学提供坚实基础,同时通过实践课程和工程实习验证和深化理论理解。

(2) 循序渐进与层次性原则。将碳中和内容按照由浅入深、由易到难的顺序融入不同层次的课程,对低年级学生以建立认知框架为主,对高年级学生则深入探讨碳中和技术与工程案例^[9]。

(3) 跨学科融合原则。碳中和问题涉及能源、环境、材料、经济、管理等多个领域,教学内容必须注重跨学科知识的整合,构建跨学科的实践教学平台^[13]。

(4) 产业需求导向原则。教学内容必须紧密对接国家“双碳”战略目标和能源产业转型需求,聚焦培养学生解决复杂碳中和能源工程问题的核心能力。

3 课程体系改革与教学内容更新

在课程结构层面,一方面增设《碳中和技术与应用》《低碳能源系统》等专业课程,填补知识空白;另一方面对《传热学》《燃烧学》等现有核心课程进行优化,有机融入碳中和内容,构建完整且系统的碳中和课程体系^[21]。同时,联合环境、经管、信息等学院开设“碳中和系统工程”“数字赋能碳管理”等跨学科课程或微专业,设立“碳中和能源系统工程”“碳捕集利用与封存技术”“智慧能源网络”等跨学科核心课程模块,强化实践环节权重,构建阶梯式培养体系^[20]。

3.1 传热学与碳中和的融合

在讲授导热、对流、辐射基本机制的基础上,补充单位热流传递效率提升对系统能耗下降的影响机制,引入换热器在工业系统中提高能效、降低碳排放的具体应用案例,如余热锅炉、冷凝换热器、空气预热器等^[10],展示其对系统碳排放强度(gCO_2/kWh)的改善效果。

热力学第一定律揭示,能量传递过程中的散热损失 Q_{loss} 必然造成系统效率下降,当该损失由化石燃料燃烧补偿时,将触发碳排放的链式反应,其定量关系为: $\Delta \text{CO}_2 = Q_{\text{loss}} \times \text{EF}_{\text{fuel}} / \eta_{\text{sys}}$ (EF_{fuel} 为燃料碳排放因子, η_{sys} 为系统热效率)。余热回收的碳减排量可按传热效能方程($\epsilon\text{-NTU}$ 法)定量计算,通过建立“热效率—碳排放量”函数关系图,引导学生分析不同工况下系统碳排放的变化趋势。

3.2 燃烧学与碳中和的融合

系统梳理燃料种类(煤、天然气、石油、生物质、氢)碳含量及热值差异,分析其单位能量碳排放因子(kgCO_2/GJ)形成机理,拓展燃烧反应化学方程式计算的深度,增加真实工业燃烧系统计算练习(如锅炉、发动机、炉窑)^[11]。

在低碳燃烧技术方面,介绍富氧燃烧、化学链燃烧(CLC)、碳捕集与封存(CCS)等前沿技术的基本原理及碳减排潜力^[3]。以化学链燃烧为例,以金属氧化物为载氧体的无氮气稀释燃烧理论碳减排率接近100%,其还原反应($\text{CH}_4 + 4\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 8\text{FeO}$)和氧化反应($8\text{FeO} + 2\text{O}_2 \rightarrow 4\text{Fe}_2\text{O}_3$)构成完整循环。

3.3 碳排放核算理论体系的构建

构建完整碳排放核算知识体系是碳中和教育的核心内容之一。在核算框架方面,系统讲授基于IPCC《国家温室气体清单指南》和GHG Protocol的碳核算框架,重点理解Scope 1(直接排放)、Scope 2(外购能源间接排放)、Scope 3(供应链排放)的界定原则与计算方法^[16];掌握核心公式:CO₂排放量=活动水平数据(AD)×排放因子(EF)×GWP,以及活动数据校准规范(AD误差 $\delta \leq 1.5\%$)。

在碳强度理论方面,深入理解碳强度(CI=总碳排放/经济或物理产出)作为衡量减排绩效核心指标的意义,掌握碳生产力、脱钩指数等衍生指标及其政策意义^[19];结合电力行业供电碳强度(gCO₂/kWh)、钢铁行业吨钢碳排放(tCO₂/t)等行业基准理论,培养学生的行业碳核算能力。

4 碳中和工程实践教学设计

4.1 火电厂碳排放量化分析实践案例

以燃煤发电机组为对象,设计多阶段递进式工程实践项目,主要目标包括:学习并应用工业过程碳排放核算的基本方法;通过实际运行数据计算不同工况下的碳排放量;分析关键运行参数(负荷率、主蒸汽参数、过量空气系数、给水温度、厂用电率等)对碳排放强度(kgCO₂/kWh)的影响规律;提出以降低碳排放强度为目标的运行优化策略;结合工程实际探讨实现机组及电厂层面碳中和的潜在技术路径。

实践内容按照“理论基础—计算分析—优化设计—路径展望—成果汇报”五个阶段依次推进。在基准工况碳排放计算阶段,学生应用所学方法计算供电碳排放强度,核心公式为:碳排放量(tCO₂)=燃料消耗量(t)×燃料低位发热量(GJ/t)×燃料排放因子(tCO₂/GJ)×碳氧化率(%)。在工况对比分析阶段,重点分析不同负荷率(50%、75%、100%)、不同主蒸汽参数、不同过量空气系数、不同给水温度以及辅机运行方式变化对碳排放强度的影响规律,通过折线图、散点图等可视化手段展示关键参数与碳排放强度之间的定量关系。

在运行优化方案设计阶段,学生需提出具体可行的优化策略,包括:负荷经济调度、蒸汽参数优化控制、燃烧优化(将过量空气系数控制在理论最优值附近)、热力系统优化(确保高压加热器正常投运)、辅机运行优化(推广变频技术)等,并对各项优化措施进行减排潜力的量化评估^[22]。在碳中和路径探讨阶段,学生从运行优化延伸到生物质掺烧、CCUS、可再生能源耦合等深度减排路径,结合碳交易市场和政府补贴等政策因素分析路径选择的技术经济性。

4.2 林木废弃物资源化利用碳核算实践案例

以某区为案例,采用LCA评价方法(IMPACT 2002+),对园林及林木废弃物的四种资源化处置路径进行全生命周期碳减排量化分析:(1)制成RDF燃料棒发电;(2)气化发电;(3)热解制油内燃机燃烧发电;(4)制成生物炭联产热能^[18]。

以该区每日处理园林废弃物114吨(38个公园,平均每园日产3吨)为基准,全面计算包括运输过程、加工过程、能源转化过程及替代发电收益在内的全链条碳排放与减排量。研究结果(见

表1)表明,四种处置路径均实现负碳排放,其中制成生物炭联产热能的CO₂减排量最高,达1150 kgCO₂/t;其次是气化发电(420.55 kgCO₂/t);RDF发电(363.50 kgCO₂/t)和热解制油发电(361.24 kgCO₂/t)相近。

表1 各种资源化方式碳减排量比较

能源回收方式	制作 RDF 发电	生物炭+热能联产	生物油发电	气化发电
CQ 减排量(kgCO ₂ /t)	363.50	1150	361.24	420.55
总减排量(10 ⁴ tCO ₂ /年)	1090.5	3450	1083.7	1261.6

如果采用气化发电作为主要处置方法,每年可发电约16.67亿kWh,同时年减排CO₂量约89.9万吨。这一案例将碳核算方法、生命周期评价与工程实践紧密结合,有效培养了学生的系统性思维和工程决策能力^[17]。

5 人才培养模式与预期成效

碳中和理论教学模型通过系统整合能源工程、环境科学和政策管理的跨学科知识,培养具备碳排放量化分析、低碳技术应用和碳资产管理能力的复合型人才^[1]。在专业能力层面,学生能够熟练运用传热学、燃烧学等专业理论解决实际减排问题,掌握国际碳核算标准(IPCC、GHG Protocol)和前沿技术,具备碳审计、碳交易和清洁能源系统优化等方向的工程实践能力^[3]。

在跨学科整合能力层面,学生能够运用多学科知识解决实际的碳中和工程挑战,理解能源—经济—环境复杂系统,掌握全生命周期碳足迹分析方法和系统优化技术^[19]。在职业素养层面,学生形成碳中和职业素养和强烈的社会责任感,赋能“企业碳管理师”、“ESG分析师”、“碳中和咨询顾问”、“绿色金融产品经理”等高速增长的新兴职业需求。

碳中和融入实践教学不仅提升了学生培养质量,也为能源类专业的学科建设注入了新活力。通过不断完善教学内容和教学方法,培养出一批具有碳中和能力的高素质人才,推动能源类专业向更高水平发展,促进产学研深度融合,加速碳中和技术的落地应用和创新发展,助力我国在全球气候治理与绿色发展中占据主动地位。

6 结语

在“双碳”战略目标深度驱动下,将碳中和理念有机融入能源类新工科人才培养体系,是高等工程教育改革的必然选择和关键路径。本研究从理论教学模型重构、实践教学深化、工程案例设计、碳核算方法体系建立四个维度,系统探索了碳中和背景下能源类专业人才培养的改革实践。

研究表明:以“传热学+燃烧学+碳核算”为核心的跨课程融合模式能够有效构建学生的碳中和理论基础;以火电厂碳排放量化分析和林木废弃物资源化碳核算为代表的工程实践案例,能够显著提升学生的工程实践能力;以“理论—实践—工程”三位一体为逻辑主线的递进式培养体系,能够系统培养面向“双碳”目标的复合型新工科人才。

未来,在课程体系优化、校企合作深化、实践平台建设等方

面还需进一步探索。这是一项需要教育主管部门、高校、企业和社会多方协同推进的系统工程,也是我国高等教育服务国家战略、引领绿色发展的重要举措。

[参考文献]

[1]王如志,崔素萍,聂祚仁.“双碳”目标视角下“四位一体”本科教育模式创新[J].中国大学教学,2022,(04):14-18.

[2]杜晓超,袁显宝,张彬航,等.能源动力类专业建设与人才培养模式的改革与实践[J].高教学刊,2021,7(15):117-120.

[3]吴啸,沈炯.碳中和背景下能源动力专业人才基本素养新特质研究[J].高教学刊,2025,11(05):50-54.

[4]张天虎,梁林,胡建军.建筑能源领域碳达峰碳中和项目式教学实践[J].黑龙江教育(理论与实践),2025,(03):49-52.

[5]王琼,李鹏辉,周杰,等.学科交叉推动高层次创新人才培养——以清华大学碳中和能力提升项目为例[J].学位与研究生教育,2025,(03):32-38.

[6]周鹏,许艺馨,韦明杰,等.“碳达峰、碳中和”背景下高职环保类专业实践教学体系重构研究[J].中国教育技术装备,2024,(09):127-130.

[7]安周建,张东,付建,等.“双碳”背景下碳中和通识类课程教育改革与实践——以兰州理工大学碳中和与新能源综合利用课程为例[J].高教学刊,2024,10(34):11-14+19.

[8]李小菊,罗川,张云,等.“双碳”理念融入《环境影响评价》课程教学改革探讨[J].创新教育研究,2024,12(1):365-372.

[9]叶波,杨丽萍,刘晖,等.“碳达峰碳中和”专题教学的构建及在环境类课程的融入[J].中国多媒体与网络教学学报(上旬刊),2023,(02):183-186.

[10]温昕,王素娟,房丽萍,等.“碳中和”背景下高分子材料与工程专业课程教学改革[J].化学教育(中英文),2023,44(10):51-55.

[11]董永军,尹冬梅,郭景富.新工科与“双碳”背景下新能源转换技术的科教融汇探索与实践[J].科教文汇,2024,(15):59-62.

[12]丁艳,王桂卿,仝军令,等.双碳背景下应用型本科能源动力类新工科人才培养探索与实践[J].制冷与空调(四川),2023,37(06):873-877.

[13]陈斌,方艺萍.“双碳”战略背景下环境类新工科“双创”人才培养与实践探究[J].高教学刊,2021,7(S1):29-33.

[14]RusT,MoldovanPR,Beu D,et al.Towards a Climate-Neutral Campus: Carbon Footprint Assessment in Higher Education Institutions[J].Applied Sciences,2025,15(7):3695.

[15]Erica U,Monique W,Martin W.The "carbon-neutral university" -- a study from Germany[J].International Journal of Sustainability in Higher Education,2018,19(1):130-145.

[16]Beiling M,Farhan M B,Xuwen P,et al.Analyzing research trends of universities' carbon footprint: An integrated review[J].Gondwana Research,2023,121:259-275.

[17]Meng J,Abed M A,Elsehrawy G M,et al. Nano-integrating green and low-carbon concepts into ideological and political education in higher education institutions through K-means clustering[J].Heliyon,2024,10(10):e31244.

[18]Almeida D T R, Blenda L S, Moura B B E A, et al. Carbon footprint in an educational institution and compensation potential in urban forests[J].Environmental Development,2023,46.

[19]Canencio P N K, Lasso A, Castrillon R, et al. Carbon footprint of higher education institutions[J].Environment, Development and Sustainability,2024,26(12):1-34.

[20]李中锐,宋关羽,樊林浩,等.“新工科”背景下储能专业实验教学新模式探索与实践[J].储能科学与技术,2025,14(04):1718-1726.

[21]李振华,黄金阳,蔡丽云,等.双碳时代土木类专业课程优化研究——以给排水科学与工程专业为例[J].四川建材,2022,48(06):254-256.

[22]帅永,陈绍文.碳中和背景下能源动力类专业的改革思考与实践——以哈尔滨工业大学为例[J].高等工程教育研究,2023,(S1):7-9.

[23]徐延宇,张立志.高职校企合作的多维困境与实践路径优化——基于共生理论视域[J].职业教育,2023,22(12):9-14.

作者简介:

尹丽洁(1981--),女,汉族,山西省运城市人,副教授,研究方向:生物质能转换,单位:同济大学汽车与能源学院。